

УДК 620.9+004.415.2  
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/36

## Платформа для генерации энергии на основе пьезоэлементов

**А.П.А. Ваким<sup>✉</sup>, А.А. Сидорова, Т.Е. Мамонова**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск*

✉ paa13@tpu.ru

### Аннотация

В последние десятилетия мы наблюдаем быстрое развитие науки и технологий в области возобновляемой и альтернативной энергетики. В этом контексте все большую актуальность приобретают исследования, связанные с генерацией энергии из неочевидных источников. Особое внимание уделяется возможности извлечения энергии из повседневных действий человека, таких как ходьба. Использование пьезоэлементов (АС\_переменный ток DC\_постоянный ток) является одним из перспективных подходов к достижению этой цели. Представленное в работе устройство способно превращать механическую деформацию, например, от давления наступающего человека на платформу, в электрическую энергию. Идея генерации энергии через пьезоэлементы при ходьбе представляет собой инновационный подход для использования в повседневных приборах. Когда человек двигается, его шаги оказывают механическое воздействие на поверхность под ногами. Этот процесс может быть зафиксирован с помощью встроенных пьезоэлементов, которые превращают каждый шаг в электрический импульс. При наличии достаточного количества пьезоэлементов и оптимальной организации можно получить значительное количество энергии. Целью представляемой работы является разработка и исследование аппаратно-программной части платформы для генерации энергии на основе пьезоэлементов.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрическая генерация энергии, альтернативная механическая энергия, пьезометрические элементы

**Для цитирования:** Авад П.А., Сидорова А.А., Мамонова Т.Е. Платформа для генерации энергии на основе пьезоэлементов // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1. – № 3. – С. 28–36. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/36

---

UDC 620.9+004.415.2  
DOI: 10.18799/29495407/2023/3/36

## Platform for energy generation based on piezoelectric elements

**A.P.A. Wakem<sup>✉</sup>, A.A. Sidorova, T.E. Mamonova**

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation*

✉ paa13@tpu.ru

### Abstract

In recent decades, we have seen rapid advances in science and technology in renewable and alternative energy. In this context, the research related to energy generation from non-obvious sources is becoming increasingly relevant. Particular attention is paid to the ability of energy extracting from everyday human activities such as walking. The use of piezoelectric elements (AC\_alternating current DC\_direct current) is one of the promising approaches to achieving this goal. The device presented in the work is capable of converting mechanical deformation, for example from the pressure of a person stepping on a platform, into electrical energy. The idea of generating energy through piezoelectric elements when walking represents an innovative approach for use in everyday devices. When a person moves, his steps have a mechanical effect on the surface under his feet. This process can be captured using built-in piezoelectric elements that turn each step into an electrical impulse. If there are a sufficient number of piezoelectric elements and optimal organization, a significant amount of energy can

be obtained. The aim of the presented work is to develop and study the hardware and software part of the platform for energy generation based on piezoelectric elements.

**Keywords:** piezoelectric energy generation, alternative mechanical energy, piezo metric elements, piezoelectric materials

**For citation:** Awad P.A., Sidorova A.A., Mamonova T.E. Platform for energy generation based on piezoelectric elements. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 3, pp. 28–36. DOI: 10.18799/29495407/2023/3/36

### Обзор существующих решений в области генерации энергии «Энергетические полы для питания токийских метрополитенов»

**Общие данные:** Когда компания East Japan Railway Company (JR East) решила инвестировать в альтернативные источники энергии, ей не пришлось долго искать идеальный источник энергии.

Недавно компания решила обновить свою станцию Токио с помощью пьезоэлектрического энергетического пола, представленного на рис. 1 [1].

Установленная ими система будет собирать кинетическую энергию, создаваемую толпами, чтобы питать кассовые ворота и информационные системы.

**Главная идея:** Пьезоэлектрическое покрытие – это технология с широким спектром применения, которая медленно внедряется в гонке за разработкой альтернативных источников энергии.

Человеческая энергия легко доступна практически в любой области с большим движением людей, такой как танцпол или в местах туристических достопримечательностей. Естественно, нас порадовало, когда мы узнали, что JR East установит эти системы в полу одной из самых оживленных станций метро на планете (рис. 2) [2].

**Результаты:** JR East испытывала эти системы в течение последнего года. Недавно они улучшили и расширили систему, изменив покрытие пола с резины на каменную плитку, и улучшив макет механизмов для увеличения генерации энергии.

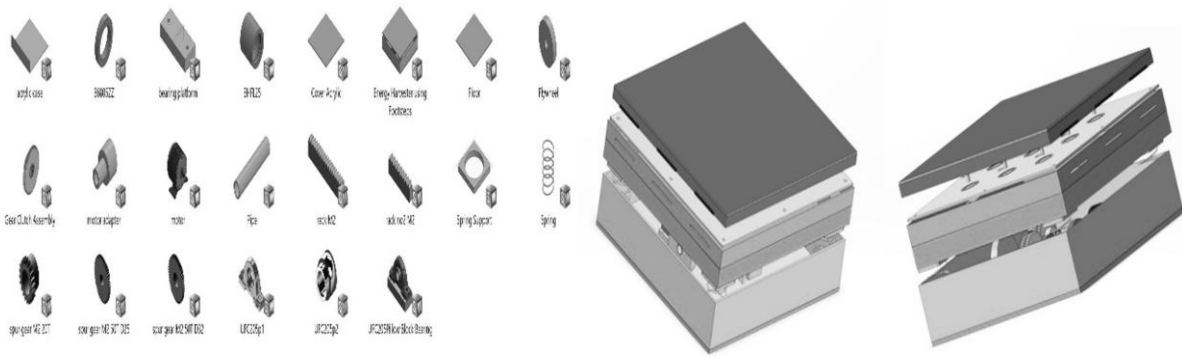
Общая площадь пола составит около 25 квадратных метров, и они ожидают получить более 1400 кВтч в день – более чем достаточно для питания своих систем (рис. 1, 2).



**Рис. 1.** Билетные ворота и системы отображения на вокзале Токио с пьезоэлектрическим энергетическим полом  
**Fig. 1.** Ticket gates and display systems at Tokyo station with piezoelectric energy floor



**Рис. 2.** Вид и местоположение платформы для генерации электроэнергии с помощью энергии шагов  
**Fig. 2.** Type and location of the platform for generating electricity using energy from steps



**Рис. 3.** Перечень компонентов и 3D-модели платформы  
**Fig. 3.** List of components and 3D model of a platform



**Рис. 4.** Алгоритм работы платформы  
**Fig. 4.** Algorithm of platform operation

### Предлагаемое решение

Предлагаемая платформа представляет собой инновационный источник возобновляемой энергии, который основан на использовании пьезоэлектрических элементов для преобразования энергии, по-

лучаемой от шагов людей. Эти элементы способны генерировать электричество при механическом давлении, что позволяет превратить места с высокой активностью людей в источники энергии.

SolidWorks обладает интуитивным интерфейсом и мощными функциями визуализации, которые помогают наглядно представить проект с высокой степенью детализации. Такие визуализации помогут продемонстрировать работу проекта и его преимущества потенциальным инвесторам, партнерам или клиентам. На рис. 3 приведен перечень компонентов платформы в ее собранном виде, более подробно это описано в [4].

Количество энергии, которое можно сгенерировать и сохранить таким образом, зависит от многих факторов, включая свойства и количество использованных пьезоэлементов, характеристики преобразователя, емкости аккумулятора и т. д. Эти аспекты можно оптимизировать для максимизации эффективности работы системы. На рис. 4 представлен общий алгоритм работы платформы.

### Сборка 3D-модели

Основная идея заключается в использовании пьезоэлектрических материалов в напольных покрытиях для генерации энергии из шагов людей. Эти напольные покрытия содержат в себе пьезоэлектрический материал, способный преобразовывать механическое напряжение, возникающее под действием шагов, в электрическую энергию.

Когда человек идет по такому напольному покрытию, давление, создаваемое его шагами, генерирует электрический заряд в пьезоэлектрическом материале.

Этот заряд может быть использован для питания малых электронных устройств и датчиков или сохранен в аккумуляторе для последующего использования.

Преимущество таких напольных покрытий заключается в том, что их легко интегрировать в существующую инфраструктуру без крупных изменений.

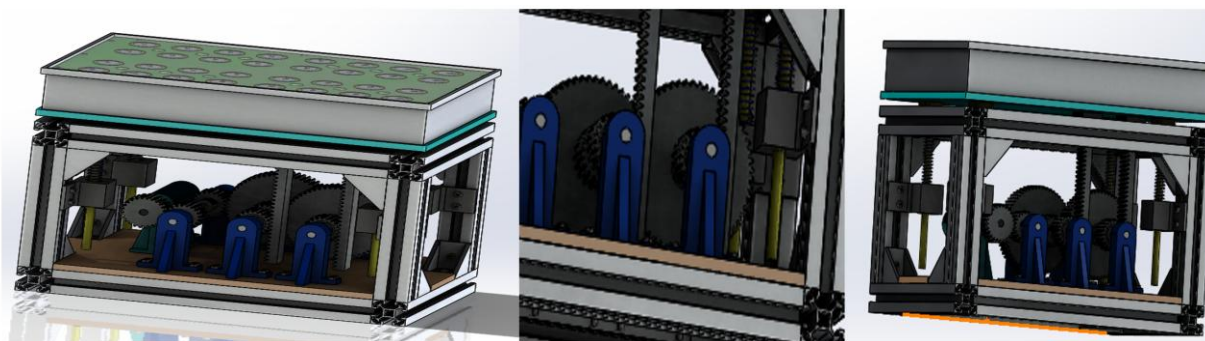


Рис. 5. 3D-модель платформы  
Fig. 5. 3D model of a platform

Это делает их экономически эффективными и масштабируемыми решениями для сбора энергии. Их использование на местах с высокой проходимостью, таких как железнодорожные станции, аэропорты и торговые центры, имеет потенциал для генерации значительного объема электроэнергии и снижения зависимости от традиционных источников энергии. Сборка 3D-модели представлена на рис. 5.

#### Принцип работы

Разработка платформы для генерации энергии на основе пьезоэлементов может быть сложным и многоэтапным процессом. Важно провести все этапы систематически, начиная с проектирования на бумаге и заканчивая созданием прототипа и его тестированием.

Общий алгоритм для разработки такой платформы следующий [5]:

1. *Определение требований:* определите цели и параметры для вашей платформы, такие как максимальная мощность, частота генерации энергии, рабочие условия и другие характеристики.
2. *Проектирование 3D-модели:* используйте SolidWorks или аналогичное программное обеспечение для создания 3D-модели вашей платформы. Учтите расположение и размеры пьезоэлементов, а также монтажную конструкцию.
3. *Разработка электрической схемы печатной платы:* создайте электрическую схему, которая включает в себя пьезоэлементы, выпрямитель для преобразования переменного тока в постоянный и другие необходимые компоненты.
4. *Разработка управляющей электроники:* разработайте контроллер, который будет отслеживать работу пьезоэлементов и управлять энергетическими процессами.
5. *Производство прототипа:* создайте физический прототип на основе 3D-модели и разработанной электрической схемы, при этом используйте технологии производства для изготовления корпуса и печатных плат.

#### Принцип работы пьезоэлектрического преобразователя

Пьезоэлектрический преобразователь работает на основе эффекта пьезоэлектричества [6]. Для построения пьезоэлектрического кристалла используются материалы, такие как кварц, соль Рошеля, двухзамещенный тартрат калия, фосфат калия дигидрогенистого, фосфат аммония дигидрогенистого и другие. Эти материалы называются пьезоэлектрическими материалами.

Когда пьезоэлектрический кристалл подвергается воздействию силы или механического напряжения, на поверхности кристалла развивается электрический потенциал. Это происходит из-за перемещения зарядов внутри кристалла.

И наоборот, если приложить электрическое напряжение, форма кристалла изменится за счет изменения его размеров. Этот процесс преобразования силы, давления или механического напряжения в электрическую энергию и наоборот называется пьезоэлектрическим эффектом, схема которого показана на рис. 6.

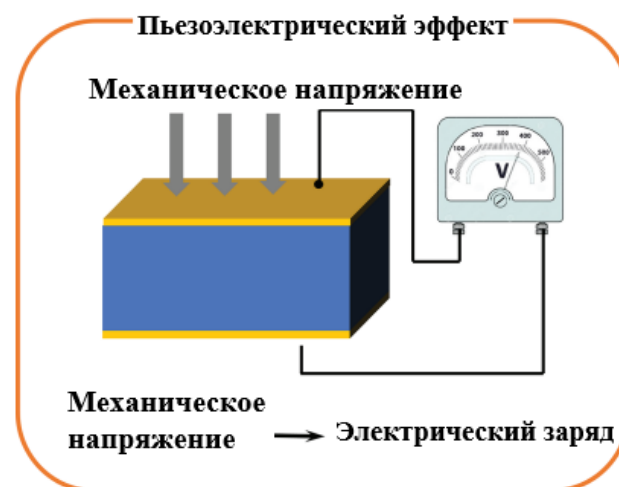
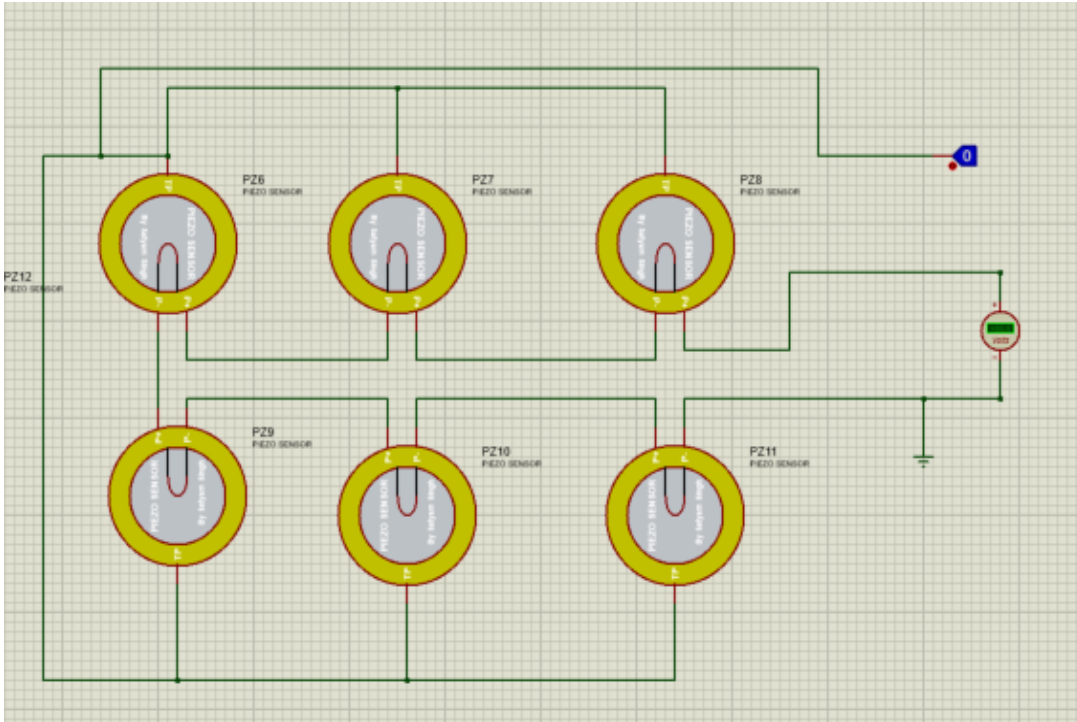


Рис. 6. Схема работы пьезоэлектрического эффекта  
Fig. 6. Piezoelectric effect operation diagram



**Рис. 7.** Схема соединения пьезоэлементов в программе Proteus  
**Fig. 7.** Connection diagram of piezoelements in the Proteus program

### Исследование пьезоэлектрической схемы в программе Proteus

Программа Proteus является системой автоматизированного проектирования электронных плат, включая работу пьезоэлектрические элементы.

Одним из интересных применений пьезоэлементов является получение энергии из шагов проходящих пассажиров на станциях метро, схема пьезоэлементов в программе Proteus представлена на рис. 7.

Для демонстрации работы схемы выполнено:

- создание схемы в Proteus: начиная с создания схемы в Proteus, которая включает в себя пьезоэлементы, выпрямитель (для преобразования переменного заряда в постоянный) и устройство для хранения энергии, такое как аккумулятор или конденсатор [7];
- настройка параметров пьезоэлементов: указываются параметры пьезоэлементов, такие как их эффективность в преобразовании механической энергии в электрическую.

В таблице представлены результаты исследования влияния количества элементов и их схемы соединения на выходное напряжение устройства.

Разработка печатной платы – это многоэтапный процесс, который включает в себя несколько ключевых шагов.

Общая последовательность этапов для создания и подготовки PCB:

1. **Проектирование схемы:** определите функциональные требования к вашей плате и создайте

схему, отображающую, как будут соединены компоненты.

2. **Выбор компонентов:** определите необходимые компоненты, такие как резисторы, конденсаторы, микросхемы и др., при этом следует учитывать параметры каждого компонента, такие как емкость, сопротивление, рабочее напряжение и т. д.
3. **Создание библиотеки компонентов:** если необходимо, создайте библиотеку компонентов, чтобы упростить их последующее добавление в схему (рис. 8).
4. **Создание схемы в PCB-дизайнере:** используйте PCB-дизайнер для печатной платы, такой как EasyEDA, KiCad, Eagle и др.
5. **Размещение компонентов:** разместите компоненты на плате в соответствии с вашей схемой и функциональными требованиями (рис. 9).

**Таблица.** Результаты исследования

**Table.** Study results

Вид соединения пьезоэлементов Type of connection of piezoelements	Количество элементов, шт Number of elements, pcs	Выходное напряжение (пьезоэлемент), В Output voltage (piezoelectric element), V
Последовательное Sequential	7	5
Параллельное Parallel	10	3,7
Последовательно-параллельное Series-parallel	6	5

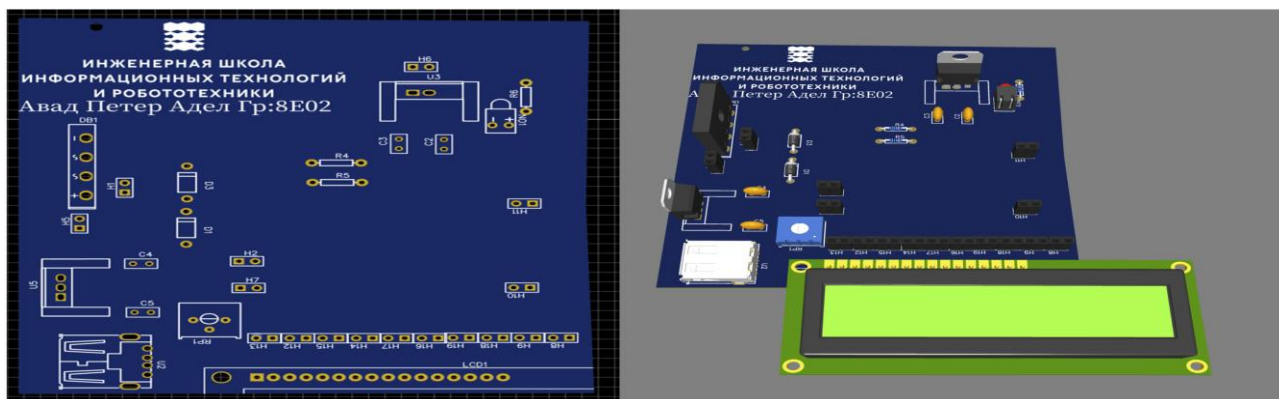


Рис. 8. Проектирование печатной платы PCB  
Fig. 8. PCB board design

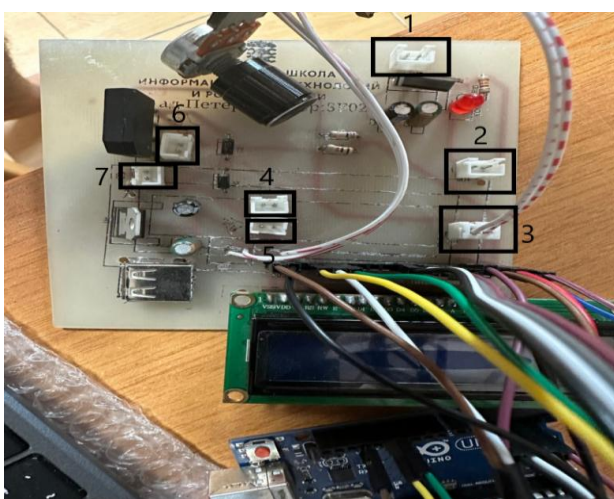


Рис. 9. Вид готовой платы PCB  
Fig. 9. View of the finished PCB board

После изготовления печатной платы и подключения всех устройств для выполнения тестирования было выполнено:

- 1) присоединение напряжения в диапазоне от 7,5 до 10 вольт к пину номер 1 (Volt\_input);
- 2) подсоединение UNO к пину номер 2 (output 5 volt);
- 3) использование пина номер 3 (для подсчета количества шагов);
- 4) подключение и проверка правильности работы преобразователя повышающего напряжения к пину номер 4 (для pin преобразователь повышающего напряжения);
- 5) подключение и проверка работоспособности преобразователя повышающего напряжения к пину номер 5;
- 6) использование пина номер 6 для получения энергии из пьезоэлемента;

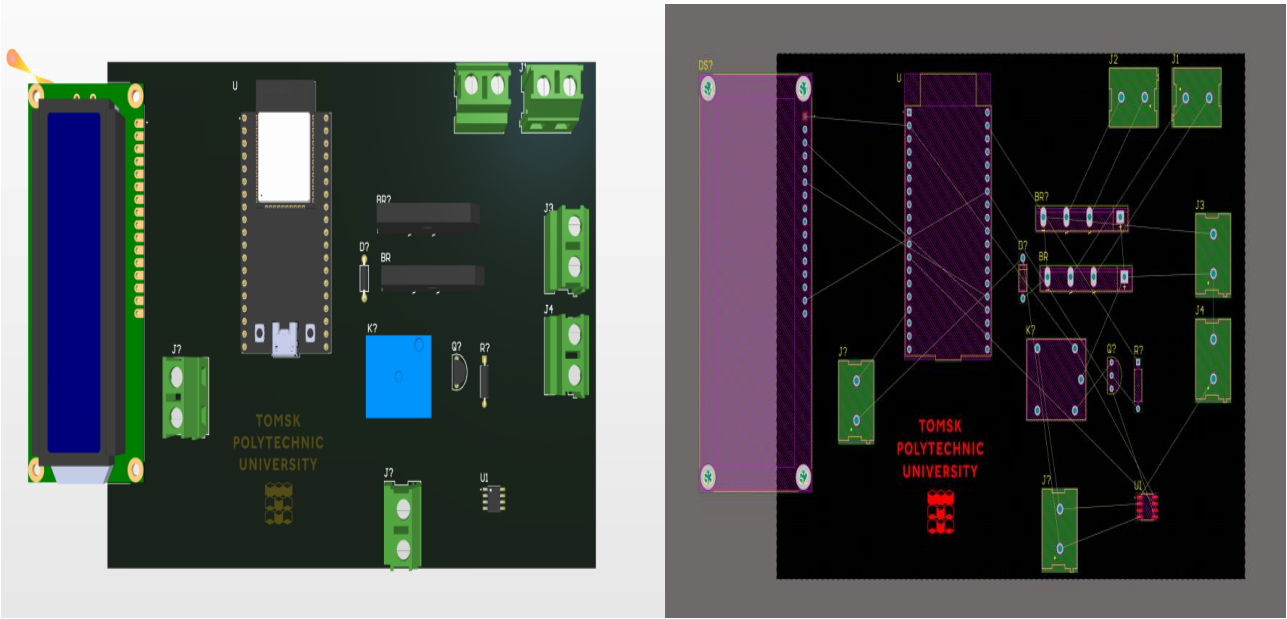
- 7) подсоединение к пину номер 7 зарядного устройства (для зарядки аккумулятора).

*Возможные варианты улучшения системы:*

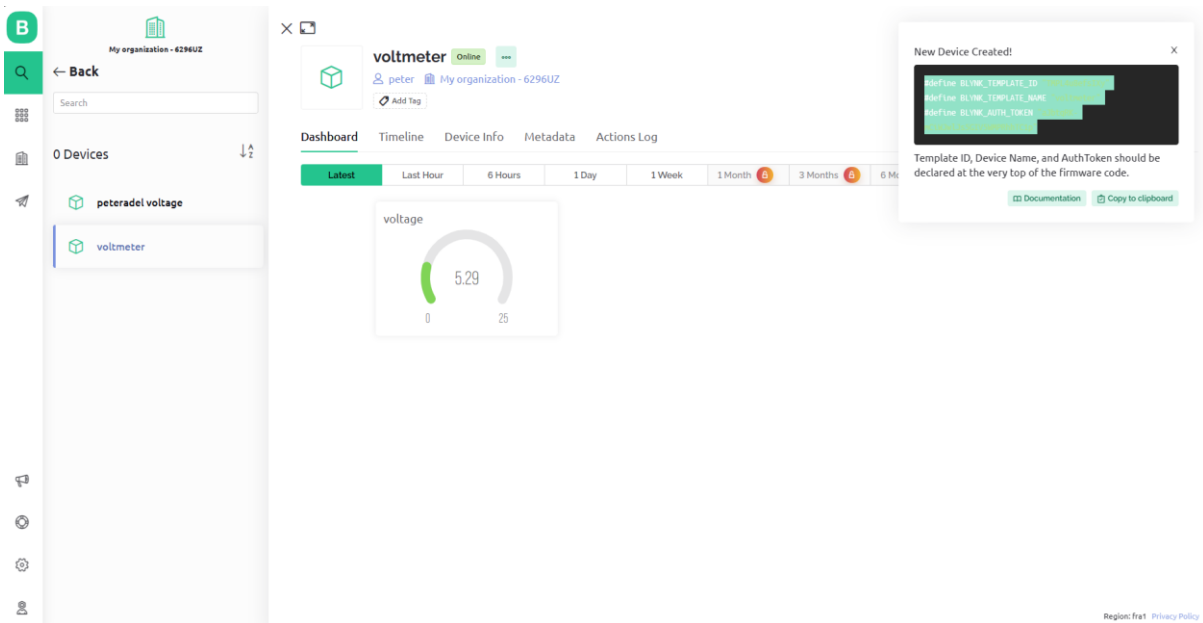
1. Использование программы Altium Designer для разработки более эффективных схем и печатных плат. Это поможет повысить производительность и надежность системы (рис. 10).
2. Хранение собранной энергии в батарее. Для хранения собранной энергии следует выбирать батарею, соответствующую поставленным мощностным требованиям.
3. Оценка потребления энергии с использованием ESP32 и Wi-Fi модели для удаленного управления через приложение Blynk. Была создана программа для мониторинга и управления потреблением энергии, вид которой представлен на рис. 11.
4. Оптимизация энергопотребления (для густонаселенных городов и мест скопления потоков людей, например, для метро) – следует доработать систему измерительными устройствами и сенсорами для регулирования яркости освещения в зависимости от окружающего освещения и наличия передвигающихся людей.

#### Разработка 3D-модели пьезоэлектрической платы

При разработке пьезоэлектрической платы была проанализирована механика работы платформы. Таким образом, при приложении силы шага человека верхний слой, выполненный из эластичного материала, будет опускаться, заставляя полусферические выступы давить на пьезоэлектрические диски. Поскольку толщина держателя пьезоэлектрических дисков составляет 3 мм, максимальное отклонение, вызванное пьезоэлектрическим диском, также будет составлять 3 мм. Когда нога поднимается, пьезоэлектрические диски возвращаются в свое исходное положение.



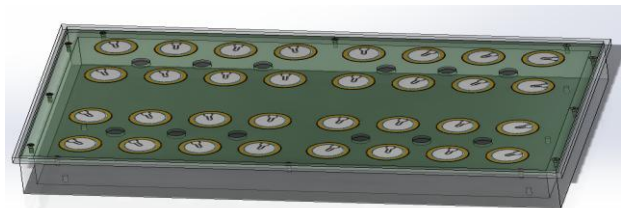
**Рис. 10.** Печатная плата PCB на Altium Designer 3D  
**Fig. 10.** RSV printed circuit board on Altium Designer 3D



**Рис. 11.** Вид окна программы для мониторинга и управления потреблением энергии в приложении Blynk  
**Fig. 11.** Blynk Power Monitoring and Management Window View

Это вертикальное движение и вибрации, сопровождающие это движение, создают импульсы переменного напряжения.

Изложенное функционирование платформы было заложено при разработке 3D-модели пьезоэлектрической платы, показанной на рис. 12.



**Рис. 12.** 3D-модель пьезоэлектрической платы  
**Fig. 12.** 3D model of piezoelectric board

## Заключение

В представленной работе было выполнено исследование влияния количества пьезоэлементов и их схемы соединения на производимую энергию. Выполненные эксперименты в программном продукте Proteus показали, что наилучшим решением является сочетание последовательно-параллельного вида соединения, что дает такую же энергию, что и последовательное соединение, но при меньшем количестве элементов.

Также разработана печатная плата, проведено её тестирование, указаны варианты улучшения алгоритма проектирования подобных устройств и их изготовления.

Максимально эффективными местами для применения разработанной платформы для генерации электроэнергии будут места скопления потоков людей, таких как станции метро, прогулочные и велосипедные дорожки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy-generating floors to power Tokyo subways // Tokyo. URL: <http://inhabitat.com/Tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/Japan-east-rail-corporation-jr-east-piezoelectric-floors> (дата обращения: 25.10.2023)
2. Modeling and characterization of piezoelectric transducers by means of scattering parameters. P. I: Theory / R.P. Paganellia, A. Romanib, A. Golfarellib, M. Magib, E. Sangiorgib, M. Tatagni // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2010. – № 160. – P. 9–18. URL: [https://www.researchgate.net/publication/223496640\\_Modeling\\_and\\_characterization\\_of\\_piezoelectric\\_transducers\\_by\\_means\\_of\\_scattering\\_parameters\\_Part\\_I\\_Theory](https://www.researchgate.net/publication/223496640_Modeling_and_characterization_of_piezoelectric_transducers_by_means_of_scattering_parameters_Part_I_Theory) (дата обращения: 20.10.2023).
3. Энергетические полы для питания токийских метрополитенов. URL: <http://inhabitat.com/tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/japan-east-rail-corporation-jr-east-piezoelectric-floors-energygenerating-floors-human-powered-motion-passengers-power-train-station-2/#ixzz3aqin1UtU> (дата обращения: 22.09.2023)
4. Авад П.А., Мамонова Т.Е. Платформы для генерации электроэнергии // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов II Международной научно-практической конференции. – Томск: Томский политехнический университет, 2022. – С. 249–251.
5. Mohammed A.K. Novel archetype of fluid-based energy generation system from human footsteps. DOI: 10.36227/techrxiv.14998014.v1. URL: [https://www.researchgate.net/publication/353343321\\_Novel\\_archetype\\_of\\_fluidbased\\_energy\\_generation\\_system\\_from\\_from\\_human\\_footsteps\\_human\\_footsteps](https://www.researchgate.net/publication/353343321_Novel_archetype_of_fluidbased_energy_generation_system_from_from_human_footsteps_human_footsteps) (дата обращения: 23.10.2023)
6. Roedel J., Li J.-F. Lead-free piezo ceramics: status and perspectives // *MRS Bulletin*. – 2018. – № 43. – P. 576–580. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.181>
7. Piezoelectric Ceramic Products. URL: [pi-usa.us/fileadmin/user\\_upload/pi\\_us/files/catalogs/Piezo\\_Ceramics\\_Piezo\\_Materials\\_Piezo\\_Technology\\_Catalog-PIC.pdf](http://pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/catalogs/Piezo_Ceramics_Piezo_Materials_Piezo_Technology_Catalog-PIC.pdf) (дата обращения: 01.11.2023)

## REFERENCES

1. Energy-generating floors to power Tokyo subways. *Tokyo*. Available at: <http://inhabitat.com/Tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/Japan-east-rail-corporation-jr-east-piezoelectric-floors> (accessed: 25 October 2023).
2. *Energeticheskiye poly dlya pitaniya tokiyskikh metropolitenov* [Energy floors to power Tokyo subways]. Available at: <http://inhabitat.com/tokyo-subway-stations-get-piezoelectric-floors/japan-east-rail-corporation-jr-east-piezoelectric-floors-energygenerating-floors-human-powered-motion-passengers-power-train-station-2/#ixzz3aqin1UtU> (accessed: 22 September 2023).
3. Avad P.A., Mamonova T.E. Platformy dlya generatsii elektroenergii [Platforms for power generation]. *Nauchnaya initsiativa inostrannykh studentov i aspirantov. Sbornik dokladov II Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Scientific initiative of foreign students and graduate students: collection of reports of the II International Scientific and Practical Conference]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. house, 2022. pp. 249–251.
4. Mohammed A.K. *Novel archetype of fluid-based energy generation system from human footsteps*. DOI: 10.36227/techrxiv.14998014.v1. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/353343321\\_Novel\\_archetype\\_of\\_fluidbased\\_energy\\_generation\\_system\\_from\\_from\\_human\\_footsteps\\_human\\_footsteps](https://www.researchgate.net/publication/353343321_Novel_archetype_of_fluidbased_energy_generation_system_from_from_human_footsteps_human_footsteps) (accessed: 23 October 2023).
5. Roedel J., Li J.-F. Lead-free piezo ceramics: status and perspectives. *MRS Bulletin*, 2018, no. 43, pp. 576–580. DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs.2018.181>
6. *Piezoelectric Ceramic Products*. Available at: [pi-usa.us/fileadmin/user\\_upload/pi\\_us/files/catalogs/Piezo\\_Ceramics\\_Piezo\\_Materials\\_Piezo\\_Technology\\_Catalog-PIC.pdf](http://pi-usa.us/fileadmin/user_upload/pi_us/files/catalogs/Piezo_Ceramics_Piezo_Materials_Piezo_Technology_Catalog-PIC.pdf) (accessed: 1 November 2023).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Авад Петер Адел Ваким**, бакалавр Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. [paa13@tpu.ru](mailto:paa13@tpu.ru)

**Анастасия Александровна Сидорова**, старший преподаватель Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050,

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Awad Peter Adel Wakem**, Master's Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. [paa13@tpu.ru](mailto:paa13@tpu.ru)

**Anastasia A. Sidorova**, Senior Lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. [sidorova@tpu.ru](mailto:sidorova@tpu.ru)

**Tatyana E. Mamonova**, Cand. Sc., Associate



г. Томск, пр. Ленина, 30. sidorova@tpu.ru

**Татьяна Егоровна Мамонова**, кандидат технических наук, доцент Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. stepte@tpu.ru

Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. stepte@tpu.ru

Поступила в редакцию: 15.11.2023

Поступила после рецензирования: 15.12.2023

Принята к публикации: 25.12.2023

Received: 15.11.2023

Revised: 15.12.2023

Accepted: 25.12.2023